

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»

Кафедра Техническая физика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование параметров воздушно-плазменной струи высокочастотного факельного плазмотрона

УДК 533.915:621373.1.029.001.5.

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Д	Бабаев Ренат Габилевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры ТФ ФТИ	Каренгин А.Г.	доцент, к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры «Менеджмент»	Меньшикова Е.В.	доцент, к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
«Техническая физика»	Шаманин И.В.	д.ф.-м.н., профессор		

Томск - 2017

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	При разработке бакалаврской работы должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Проведение обзор и анализ видов ВЧ-плазмотронов и методов определения параметров плазменных струй, генерируемых плазмотронами. 2. Разработка алгоритма расчета теплофизических параметров плазменных струй, генерируемых ВЧФ-плазмотронами. 3. Проведение экспериментальных исследований теплофизических параметров плазменных струй, генерируемых ВЧФ-плазмотроном 4. Экономическое обоснование проведения НИР. 5. Выводы по работе. Заключение
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Экспериментальная часть	доцент кафедры «Техническая физика» Каренгин А.Г.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	доцент кафедры «Менеджмент» Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	ассистент кафедры «Прикладная физика» Гоголева Т.С.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	12.05.2017
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры ТФ ФТИ	Каренгин А.Г.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Д	Бабаев Р.Г.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту

Группа	ФИО
0А3Д	Бабаев Ренат Габилевич

Институт	ФТИ	Кафедра	ТФ
Уровень образования	бакалавр	Направление	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	SWOT-анализ

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Альтернативы проведения НИ</i>
4. <i>График проведения и бюджет НИ</i>
5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры «Менеджмент»	Е.В. Меньшикова	доцент, к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Д	Бабаев Ренат Габилевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Д	Бабаев Ренат Габилевич

Институт	ФТИ	Кафедра	ТФ
Уровень образования	бакалавр	Направление	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы);
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ и ВЧФ-плазмотроне; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент кафедры ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Д	Бабаев Ренат Габилевич		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Способность проводить математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P2	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов.
P3	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок.
P4	Готовность к разработке проектной и рабочей технической документации, оформление законченных проектно-конструкторских работ.
P5	Готовность к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P6	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем.
P7	Готовность к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P8	Готовность разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P9	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
P10	Способность понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 74 страницы, 16 рисунков, 22 таблицы, 25 источников, 46 формул.

Ключевые слова: плазма, высокочастотный факельный разряд, высокочастотный факельный плазмотрон, плазменная струя.

Объектом исследования являются режимы работы высокочастотного факельного плазмотрона.

Цель работы – исследование параметров воздушно-плазменной струи, генерируемой высокочастотным факельным плазмотроном.

В процессе исследования определялось влияние газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на потери тепловой мощности в корпус высокочастотного факельного плазмотрона, а так же влияние мощности высокочастотного факельного разряда на потери тепловой мощности в корпус электрода и КПД плазмотрона.

В результате исследования определены оптимальные режимы, обеспечивающие работу высокочастотного факельного плазмотрона с максимальным КПД.

Область применения: результаты проведенных исследований могут быть использованы для модернизации действующих ВЧФ-плазмотронов и повышения эффективности их работы.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Плазма – полностью или частично ионизированный газ, состоящий из заряженных частиц (ионов и электронов) и нейтральных атомов или молекул. Основная особенность плазмы – квазинейтральность, при которой объемные плотности отрицательных и положительных заряженных частиц, из которых образована плазма, оказываются одинаковыми.

Плазмотрон – устройство, генерирующее потоки плазмы.

ВЧФ-плазмотрон – устройство для генерирования воздушно-плазменных потоков.

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

ВЧФП – высокочастотный факельный плазмотрон

ВЧИП – высокочастотный индукционный плазмотрон

ВЧЕП – высокочастотный емкостный плазмотрон

СВЧ плазмотрон – сверхвысокочастотный

ВЧГ – высокочастотный генератор

ВЧФР – высокочастотный факельный разряд

КПД – коэффициент полезного действия

P_a – потери тепловой мощности, выделяемой на аноде генераторной лампы

P_c – потери тепловой мощности, выделяемой на сеточной индуктивности высокочастотного генератора.

$P_{кп}$ – потери тепловой мощности, выделяемой на корпусе плазмотрона

$P_{эл}$ – потери тепловой мощности, выделяемой на электроде плазмотрона

$P_{разр}$ – мощность разряда определяется по формуле

$P_{стр}$ – мощность воздушно-плазменной струи

$T_{стр}$ – температура воздушно-плазменной струи

$\eta_{уст}$ – КПД плазменной установки

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП.....	6
РЕФЕРАТ	7
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	8
СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	9
ВВЕДЕНИЕ.....	12
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	14
1.1 Высокочастотные факельные плазмотроны.....	14
1.2 Перспективы применения высокочастотных факельных плазмотронов ..	16
1.3 ТЕПЛОВЫЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ	18
1.3.1 Измерение температуры плазмы по ее энтальпии.....	18
1.3.2 Метод динамической термопары.....	24
1.3.3 Метод цилиндрического термометра сопротивления	25
1.3.4 Метод поверхностных точек	26
1.3.5 Определение теплового потока по изменению температуры поверхности датчика	27
1.3.6 Экспоненциальный (калориметрический) метод.....	28
1.3.7 Определение теплового потока по времени до начала плавления материала	31
2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ВЧФ-ПЛАЗМОТРОНА.....	32
3. ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ВЧФ - ПЛАЗМОТРОНА.....	34
4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	41
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	41
4.2 Анализ конкурентных технических решений	41
4.3 SWOT-анализ.....	43
4.4 Планирование научно-исследовательских работ.....	46
4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования	46
4.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ	47

4.4.3 Разработка графика проведения научного исследования	48
4.4.4 Бюджет научно-технического исследования	49
4.4.5 Расчет материальных затрат НТИ	50
4.4.6 Амортизация оборудования	51
4.4.7 Основная заработная плата исполнителей темы.....	51
4.4.8 Отчисления во внебюджетные фонды	54
4.4.9 Накладные расходы.....	54
4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	55
4.6 Определение ресурсоэффективности исследования	56
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	58
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории	58
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на плазменной установке и ПЭВМ.	60
5.2.1 Организационные мероприятия.....	60
5.2.2 Организация рабочего места пользователя ПК.....	60
5.2.3 Правила техники безопасности при эксплуатации установки	62
5.3 Условия безопасной работы.....	64
5.4 Электробезопасность	67
5.5 Пожарная безопасность	69
ВЫВОДЫ.....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	73

ВВЕДЕНИЕ

Развитие теоретических основ плазменных технологий, а также разработка специального оборудования, создали предпосылки для внедрения их в промышленность. К таким технологиям относятся пиролиз углеводородов, получение простых и сложных оксидов, карбидов, нитридов, различных композиционных материалов (катализаторов, ферритов, магнитоносителей, электрорадиокерамики и др.). Широко распространены в промышленности процессы плазменной резки, сварки, термообработки, плазменного травления поверхностей. Благодаря внедрению целого ряда плазмохимических процессов значительный прогресс достигнут в электронной промышленности.

Повышенный интерес ученых и производителей к применению низкотемпературной плазмы обусловлен рядом специфических свойств плазмы, которые значительно расширяют ее технологические возможности.

В настоящее время получили распространение плазмотроны:

- высокочастотные индукционные (ВЧИ), в которых используется высокочастотный безэлектродный разряд Н-типа;
- высокочастотные емкостные (ВЧЕ), в которых возбуждается высокочастотный разряд Е-типа с внешними электродами;
- высокочастотные факельные (ВЧФ), использующие высокочастотный моноэлектродный разряд;
- сверхвысокочастотные (СВЧ), в которых разряд возбуждается в полых волноводах.

Выбор генератора для проведения, данного плазмохимического процесса определяется термодинамическими и кинетическими особенностями последнего [1,2]. Генератор низкотемпературной плазмы, используемый в технологическом процессе, должен отвечать следующим требованиям:

- температура плазмы на выходе из генератора должна быть порядка тысяч градусов (от 2500 до 20000 K);
- плазменное образование должно быть достаточно чистым, т.е. свободным от загрязнения такими частицами, которые не входят в состав рабочего тела;
- параметры низкотемпературной плазмы должны обеспечивать оптимальные условия процесса и быть управляемыми;
- генерация плазмы должна обеспечиваться в течении длительного промежутка времени;
- К.П.Д. процесса преобразования первичной энергии в энергию плазмы должен быть достаточно высок.

Цель выпускной квалификационной работы – определение оптимальных режимов работы высокочастотного факельного плазмотрона.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Высокочастотные факельные плазмотроны

Первые эксперименты по изготовлению вида разрядных камер, имеющих с одного края контакт с электродом были приняты в 1960-1961 гг. В работах в первый раз использовали стабилизацию разряда аксиальным потоком и заземление (с помощью коаксиального электрода) для увеличения емкостной связи факела с землей. Таким образом плазмотрон факельного типа считают прообразом емкостного. На рисунке 1 представлена схема факельно-емкостного плазмотрона [3].

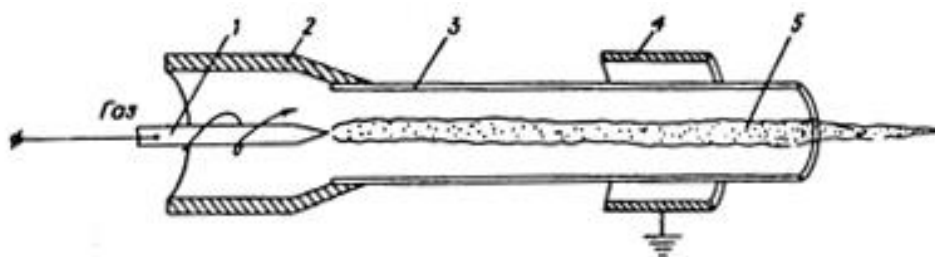


Рисунок 1 – Схема факельно-емкостного плазмотрона.

1 – высоковольтный электрод; 2 – газотормирователь; 3 – кварцевая труба; 4 – коаксиальный заземлённый электрод, 5 – разряд.

Высокочастотный факельный плазмотрон (рисунок 2), состоит из металлического корпуса 1 с охлаждаемым водой соплом 2 и охлаждаемого водой электрода 3, электрически изолированного от корпуса изолятором 10 из радиотехнического фарфора. Плазмообразующий газ и газообразные реагенты напускаются через штуцер 9 и газовый распределитель 8, откачка через штуцер 5. Поток высокочастотной плазмы возбуждается с электрода 3 и формируется в сопле 2. В рабочем режиме мощность, вкладываемая в разряд, и скорость прокачки плазмообразующего газа подбираются таким образом, чтобы в области измерений находился стабильный цилиндрический столб плазмы, отделенный от корпуса плазмотрона потоками холодного газа. Для проведения гетерогенных плазмохимических реакций верхняя крышка

плазмотрона может быть заменена на устройство подачи мелкодисперсного порошка. Вакуумноплотные диэлектрические окна-линзы 4 предназначены для измерений параметров плазмы микроволновыми методами. На таком же расстоянии от электрода, как и линзы, находятся два штуцера 6 с окнами из LiF, которые используются для проведения спектральных исследований, а в случае получения плазмы с высокой плотностью электронов могут быть применены для лазерной диагностики. Штуцер 7 предназначен для ввода в разрядную зону сменных электрических зондов Ленгмюра [4].

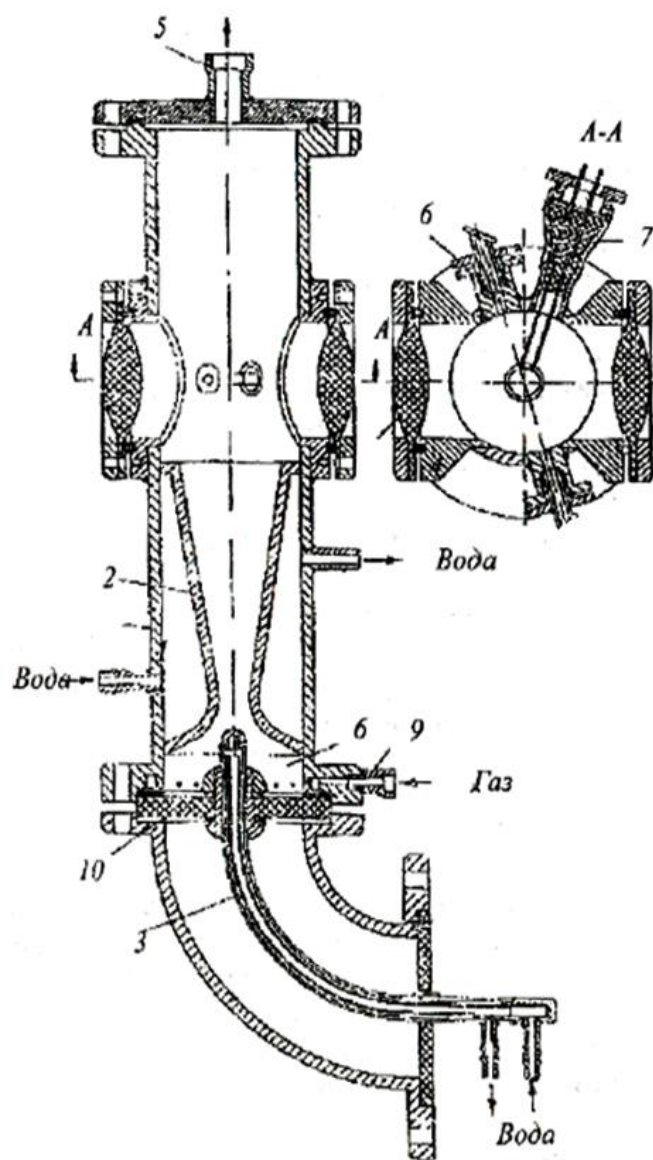


Рисунок 2 – Высоочастотный факельный: 1 – металлический корпус; 2 – сопло; 3 – электрод; 4 – окна-линзы; 5,6,7,9 – штуцер; 8 – газовый распределитель.

На рисунке 3 приведена схема ВЧФ-плазмотрона, предназначенного для генерирования воздушно-плазменных потоков со среднемассовой температурой до 4000 К [3,4].

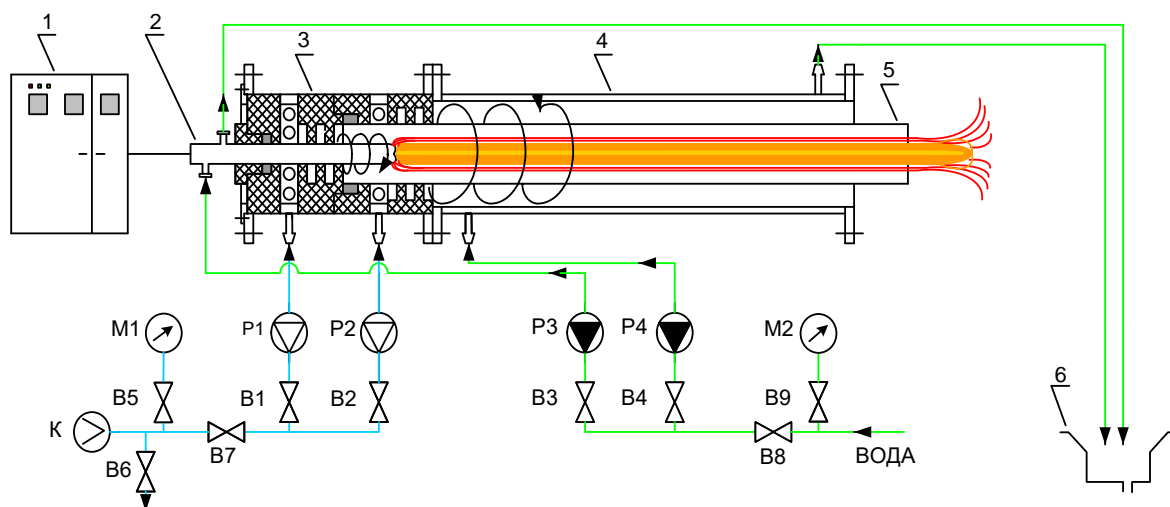


Рисунок 3 – Схема ВЧФ-плазмотрона: 1 - высокочастотный генератор; 2 - электрод; 3 - узел ввода плазмообразующего и охлаждающего газа; 4 - корпус плазмотрона; 5 - разрядная камера плазмотрона; 6 - слив охлаждающей воды; К - компрессор; M1, M2 - манометры; P1-P4 - ротаметры; B1-B9 – вентили

1.2 Перспективы применения высокочастотных факельных плазмотронов

ВЧФ-плазмотроны имеют высокий КПД (не менее 95%), работают при атмосферном давлении с использованием воздуха в качестве плазмообразующего газа и позволяют генерировать высокоэнтальпийные воздушно-плазменные потоки со среднемассовой температурой до 4000 К [5]. Ресурс работы таких плазмотронов достигает нескольких тысяч часов и ограничивается только ресурсом электровакуумных изделий ВЧ генератора. Эти достоинства позволяют использовать ВЧФ-плазмотроны для плазменной переработки различных веществ, в том числе токсичных и радиоактивных.

В отличие от ВЧИ-плазмотронов ВЧФ-плазмотрон отличается высокой механической прочностью, отсутствием специального устройства

для возбуждения разряда и надежностью в эксплуатации. На рисунке 4 изображена схема плазменного стенда.

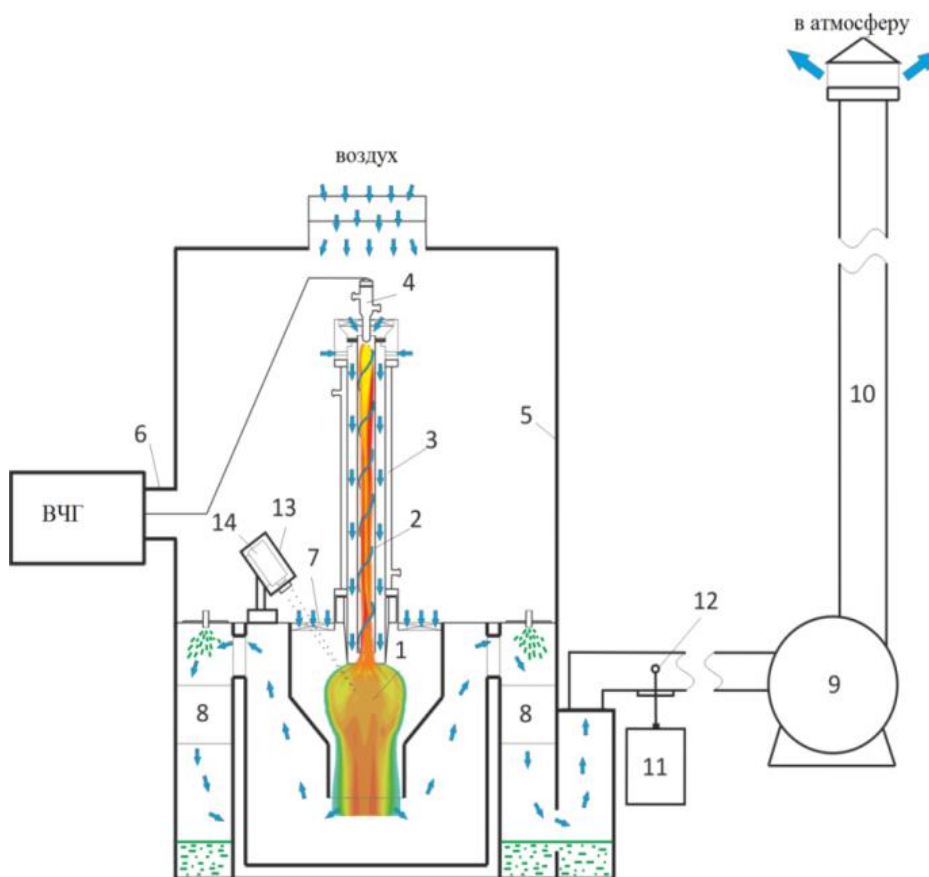


Рисунок 4 – Схема плазменного стенда «Плазменный модуль на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01». 1 – диспергатор, 2 – ВЧФ-разряд, 3 – ВЧФ-плазмотрон; 4 – медный электрод, 5 – корпус; 6 – коаксиальный вывод; 7 – импеллер реактора; 8 – узел «мокрой» очистки отходящих газов; 9 – вытяжной вентилятор (ВР 12-26, №4), 10 – воздуховод, 11 – газоанализатор «Quintox» КМ 9106, 12 – пробоотборник; 13 – защитный кожух пирометра, 14 – пирометр IPE 140/45, ВЧГ – высокочастотный генератор ВЧГ8-60/13-01

ВЧ энергия подается в плазмотрон по токоподводу 1. ВЧФ-разряд генерируется с водоохлаждаемого трубчатого электрода 2, электрически изолированного от заземленного корпуса 5 прокладкой 3 из радиотехнического фарфора. Плазмообразующий газ подается в зону разряда 7 тангенциально через штуцер 4. Кварцевая вставка 6, помещенная в

водоохлаждаемый металлический корпус 5, предохраняет от контакта с теплоносителем металлический корпус плазмотрона. Выходное сопло 8 плазмотрона выполнено с уступом 9 и охлаждается водой. Выравнивание температурного поля происходит в зоне 10. Камера смешения 11 теплоносителя включает в себя форсунки для диспергирования растворов или диспергаторы твердой фазы. Из реакционной зоны 12 продукты реакции подаются в закалочное устройство и далее в аппараты разделения и улавливания.

1.3 ТЕПЛОВЫЕ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

1.3.1 Измерение температуры плазмы по ее энтальпии

Из существующих немногочисленных методов измерения температуры газа наиболее распространен и хорошо разработан метод, основанный на измерении доплеровского уширения линий [6,7]. Однако его трудно применять при высокой плотности и температуре плазмы из-за сложности получения достаточного разрешения, так как на доплеровское уширение накладывается уширение, обусловленное эффектом Штарка, а при низких температурах – из-за малости эффекта. Другие методы определения температуры тяжелых частиц имеют ограниченное применение. Так, метод, основанный на измерении скорости звука, применим только при очень малой степени ионизации и обладает недостаточным разрешением, а метод, использующий рассеяние монохроматического излучения лазера, требует больших размеров плазмы и результаты зависят от температуры электронов.

Наиболее удобен и оперативен метод определения температуры газа по его энтальпии, отличающийся от других простотой и возможностью проводить локальные измерения. Впервые для плазмы этот метод был применен Греем [8]. Определение энтальпии основано на измерении теплового потока, воспринимаемого датчиком при отборе ионизованного

газа через внутренний капилляр (рис.5.а). Зная расход газа через капилляр G_r и температуру газа на выходе из датчика T_r^0 , можно определить энтальпию плазмы:

$$H = (Q/G_r) + H_0,$$

где Q – тепловой поток, полученный датчиком при отборе газа; H_0 – энтальпия газа, соответствующая температуре T_0 .

Конструкция датчика (см. рис.5.а) состоит из коаксиальных тонкостенных трубок, позволяющих охлаждать датчик и отбирать газ в передней критической точке продольно обтекаемого цилиндра.

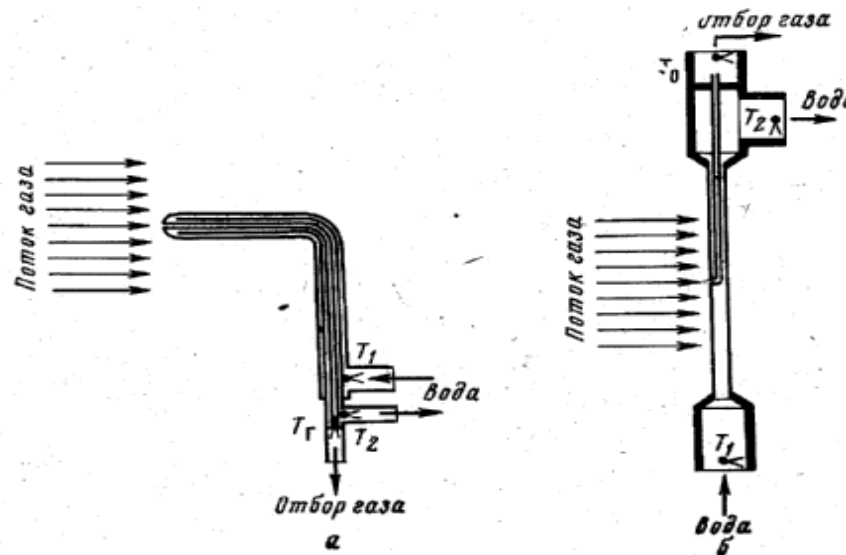


Рис.5. Схема энтальпийных датчиков: а – по данным Грея [8];

б – с повышенной чувствительностью [8].

На рис.5.б несколько иной энтальпийный датчик с разнесенными входом и выходом охлаждающей воды. Такая конструкция требует только двух коаксиальных трубок, что позволяет значительно уменьшить его диаметр и тем самым увеличить чувствительность, не изменяя способа измерения энтальпии. Минимальный диаметр датчика составлял 1,35 мм, что значительно меньше минимального диаметра (2,3 мм) датчика Грея, а максимальный диаметр 5 мм. Датчики изготовлены из меди, никеля и

нержавеющей стали. Диаметр отверстия для отбора газа равен 6,4 – 1 мм. Схема измерения энтальпии плазмы приведена на рис.6.

Энтальпийный датчик устанавливался перпендикулярно потоку, так чтобы отверстие датчика, через которое отбирается газ, было направлено навстречу движению газа и находилось на передней критической линии цилиндра. Датчик центрировался относительно оси струи по темному пространству вблизи отверстия, образуемому при пропускании через внутренний капилляр холодного воздуха. Газ отбирался через датчик форвакуумным насосом, который соединялся с регистрирующим ротаметром через предварительно откачиваемую колбу. Данный датчик позволял также определять динамический напор струи плазмы.

При измерении температуры газа в плазме с помощью энтальпийного датчика очень важна его чувствительность. В соответствии с методом измерения энтальпии за чувствительность датчика принимается отношение теплового потока, полученного за счет протекания горячего газа через капилляр, к полному тепловому потоку, полученному датчиком в плазменном потоке:

$$\sigma = (\Delta T_f - \Delta T_n) / \Delta T_f,$$

где ΔT_f и ΔT_n – увеличение температуры охлаждающей воды с отбором и без отбора газа соответственно.

При рассмотрении чувствительности, исходя из условий теплоотдачи между плазмой и стенкой датчика, Грей предположил наличие ламинарного течения снаружи датчика и внутри капилляра [9,10]. Так как параметры плазмы вдоль датчика изменяются, уравнения, описывающие теплообмен, не линейны. Грей, вводя эффективную температуру и усредняя параметры плазмы по длине датчика, получил среднее значение чувствительности, которое затем сравнивал с экспериментальными значениями. Хорошего совпадения не наблюдалось.

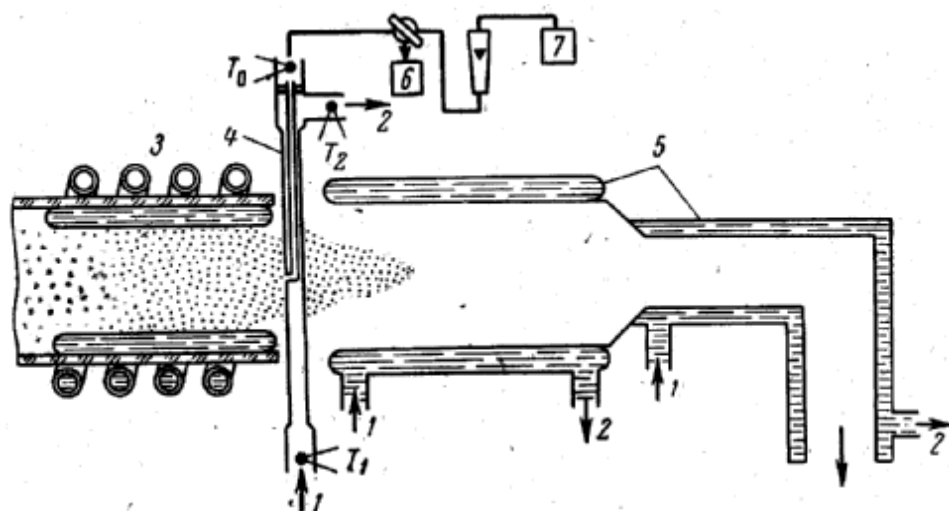


Рис.6. Схема измерения энтальпии плазмы:

1 и 2 – соответственно вход и выход охлаждающей воды в калориметре; 3 – высокочастотная горелка; 4 – энтальпийный датчик; 5 – калориметр; 6 – датчик; 7 – откачивающая система.

Однако точное значение чувствительности не всегда требуется, более важна максимальная чувствительность, которая позволяет определить пределы применимости энтальпийного датчика. Максимальная чувствительность достигается, когда отбираемый газ полностью отдает свое тепло, охлаждаясь в капилляре до температуры стенки. Массовая скорость газа, проходящего через датчик, не должна превышать массовой скорости течения плазмы, иначе структура потока будет нарушена. Формулу для вычисления максимальной чувствительности энтальпийного датчика можно представить в виде:

$$\sigma_{\max} = H\rho v S_K / Q_f,$$

где ρv – массовый расход отбираемого газа (ρ – плотность газа; v – скорость его в трубке); S_K – площадь поперечного сечения входного отверстия для отбора газа; Q_f – полный тепловой поток, получаемый датчиком.

На рис.7 представлены расчетные зависимости максимальной чувствительности датчика от температуры при разных фиксированных

скоростях течения аргонной плазмы. Полный тепловой поток Q_f вычислялся из условий теплообмена датчика с потоком плазмы по критериальной зависимости:

$$Q_f = Q_n + H\rho v S_k,$$

где $Q_n = 0,5 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,4} \left[\frac{(\rho\mu)_{пл}}{(\rho\mu)_{ст}} \right]^{0,2} \cdot \left\{ 1 + Le_{амб}^{0,52} \frac{H_i}{H} \right\} \frac{\Delta H}{c_p} \pi dl$ – тепловой поток на датчик без отсоса газа; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность; μ – вязкость; c_p – теплоемкость; H_i – энтальпия ионизации; ΔH – энтальпийный напор; $Le_{амб}$ – критерий Льюиса-Семенова, учитывающий только амбиполярную диффузию.

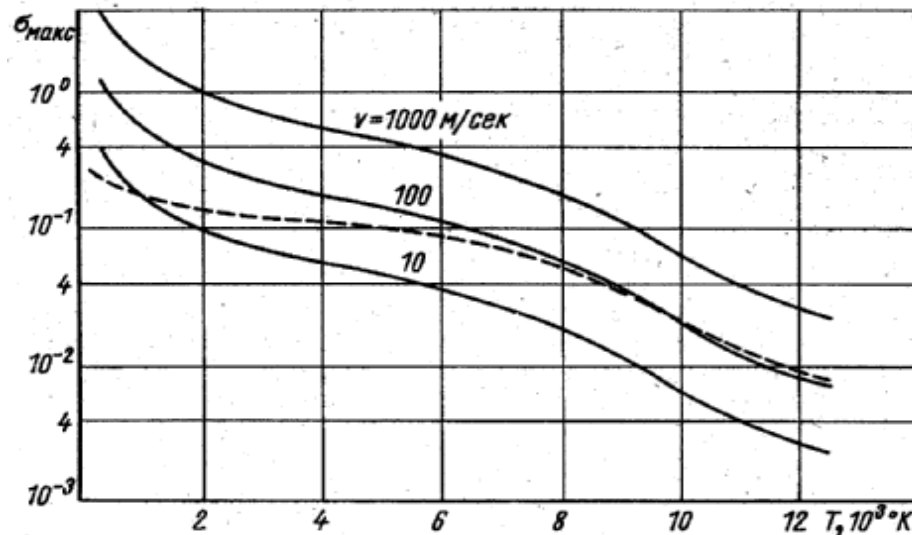


Рис.7. Зависимость максимальной чувствительности энтальпийного датчика от температуры плазмы аргона ($d=5$ мм, $l=10$ мм): $v=v_0 T/T_a$ (при $\Gamma_0=10^3$ К, $a=10$ м/сек).

Индексы «пл» и «ст» относят свойства газа к температуре плазмы и стенки соответственно: d и l – диаметр и длина поверхности датчика, находящейся в плазме. Расчет производился на единицу длины $l=1,0$ см для $d=0,5$ см. Диаметр капилляра считался равным 1,0 мм. В соответствии с рис.7 чувствительность датчика с увеличением температуры падает, а с увеличением скорости течения плазмы растет. Пунктирная кривая вычислена

для условий, когда скорость течения прямо пропорциональна температуре плазмы. Измерения более точны в области низких температур и высоких скоростей плазмы. В соответствии с работой [5] при переходе к молекулярному газу, например к кислороду, чувствительность датчика возрастает.

Учитывая рассмотренную чувствительность энтальпийного датчика и погрешности определения теплового потока при отборе газа через капилляр $\pm 5\%$, градуировки расходомера $\pm 3\%$, расчета энтальпии в зависимости от температуры $\pm 2\%$, можно считать, что погрешность определения температуры составляет $\pm 10\%$. При отсутствии в плазме термодинамического равновесия точность определения температуры уменьшается, но погрешность при этом не превышает $\pm 20\%$. Измерение температуры тяжелых частиц плазмы по теплоотдаче к поперечно обтекаемому цилиндру. В последнее время развивается метод, основанный на измерении теплоотдачи от плазмы к вносимым телам [11,12,13]. Критериальная зависимость позволяет установить связь между плотностью теплового потока, скоростью течения плазмы или динамическим напором и температурой. Обычно тепловой поток измеряют с помощью цилиндрического калориметрического датчика, а скорость течения плазмы — по измерениям динамического напора. Критериальная зависимость используется в следующем виде:

$$\frac{q}{\sqrt[4]{p}} = 0,6 \text{Pr}^{0,4} \frac{\lambda \rho^{0,25}}{\sqrt{d\mu}} \left[\frac{(\rho\mu)_{na}}{(\rho\mu)_{cm}} \right]^{0,2} \left[1 + (Le^{0,52} - 1) \frac{H_d}{H} \right] \frac{\Delta H}{c_p},$$

где p — динамический напор, H_d — энтальпия диссоциации.

В правой части все параметры зависят только от температуры и, следовательно, величину $q/\sqrt[4]{p}$ можно вычислить и сопоставить с экспериментальными значениями. Из этого сопоставления и определяется температура плазмы. Точность определения температуры плазмы зависит от правильности выбора критериальной зависимости, точности определения

условий теплообмена, погрешности определения теплофизических характеристик плазмы и погрешности измерения теплового потока и скоростного напора плазменной струи. Приведенная критериальная зависимость подтверждена экспериментально с погрешностью $\pm 25\%$. Погрешность вычисления температуры по тепловому потоку и скорости течения плазмы составляет $\pm 10\%$. в области температур, где имеет место ионизация или диссоциация газа.

1.3.2 Метод динамической термопары

Как и большинство нестационарных калориметрических методов он основан на измерении поглощенного в датчике тепла, т. е. на измерении скорости нагрева спая термопары. Спай термопары изготовлялся в виде сферы или цилиндра. В последнем случае термопара сваривалась встык (бескорольковая термопара) и образовывала сплошной цилиндр.

В работе [5] термопара вводилась в плазму с помощью электромагнита. На рис.8 приведена схема устройства, позволяющего быстро вводить спай термопары в определенную точку плазмы. В схеме предусмотрена плавная регулировка времени выдержки термопары в плазме с помощью сопротивлений R7 и R8 в пределах 0,05-10 сек, что позволяет предохранить термопары от перегрева. Плотность теплового потока вычислялась с помощью выражений для цилиндра и сферы соответственно

$$q = \rho c_p \frac{d}{4} \cdot \frac{dT}{dt} \text{ и } q = \rho c_p \frac{d}{6} \cdot \frac{dT}{dt},$$

где d – диаметр; p – плотность; c_p – теплоемкость термопары. Данный метод позволяет измерять непосредственно локальную плотность теплового потока.

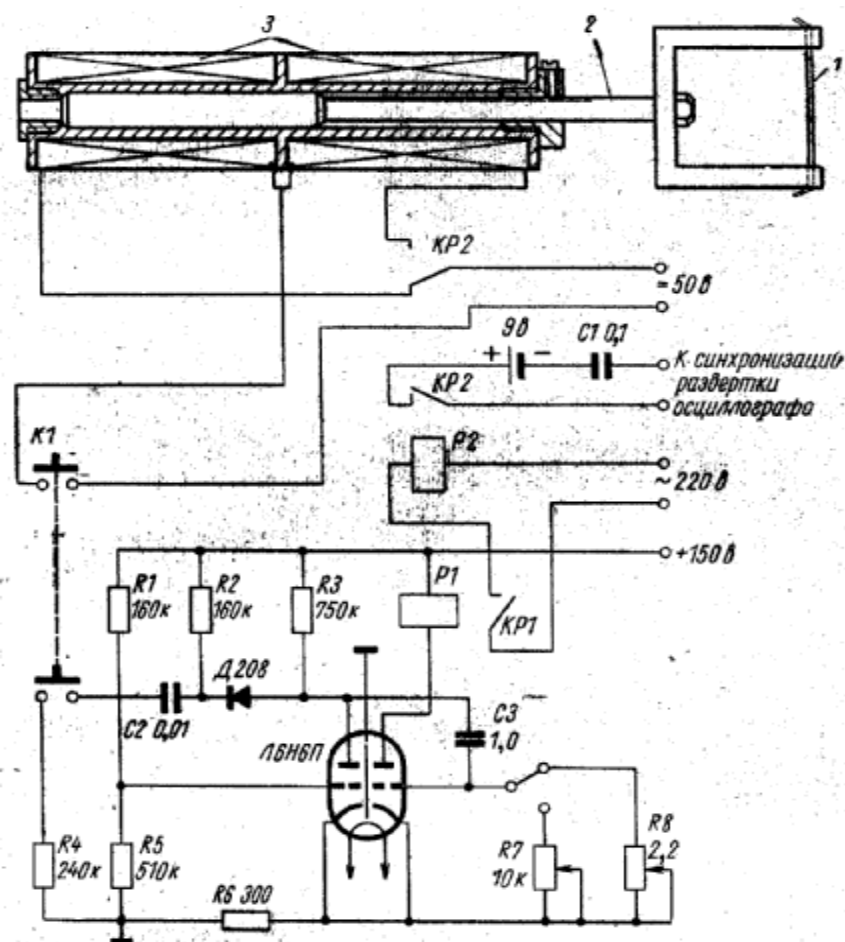


Рис. 8. Схема динамической термопары:

1 – бескорольковая термопара; 2 – подвижный шток; 3 – электромагнит; К1 – кнопка пуска; Р1 – реле управления (РСМ – 2); Р2 – реле переключения обмоток магнита (МКУ – 48)

1.3.3 Метод цилиндрического термометра сопротивления

В работе [5] для измерения тепловых потоков использовался калориметрический метод цилиндрического (проволочного) термометра сопротивления. Тепловой поток на единицу цилиндрического датчика (проволоки) определяется выражением $Q_l = c_p m_l dT / dt$, где c_p – теплоемкость материала датчика; m_l – масса проволоки на единицу длины. Изменение температуры проволоки обычно регистрируется путем измерения ее электрического сопротивления $R_t = R_0(1 + \alpha_R T)$, где α_R – температурный коэффициент электрического сопротивления; R_0 – электрическое

сопротивление проволоки при температуре окружающей среды – атмосферы. Измерение R_t обычно производится с помощью мостовой схемы. Для упрощения вычислений теплового потока следует поддерживать постоянными напряжение U_0 , подаваемое на мост, и силу тока I , протекающего через R_t . В этом случае напряжение U_t , измеряемое осциллографом, определяется выражением

$$U_t(x) = (R_t - R_0)I$$

Учитывая, что $R_0 = 4\rho_R l / \pi d^2$, где ρ_R – удельное электрическое сопротивление проволоки; l – ее длина, плотность потока

$$q(x) = \frac{\pi^2 \rho_c p d^4}{16 \alpha_R \rho_R I} \cdot \frac{dU_t(x)}{dt},$$

где $q(x)$ – плотность теплового потока в зависимости от положения датчика в потоке плазмы; ρ – плотность материала датчика; d – его диаметр; $U_t(x)$ – падение напряжения на проволоке.

Данный метод для определения локальной плотности теплового потока требует применения пересчета измеренных значений $q(x)$ в радиальное распределение.

1.3.4 Метод поверхностных точек

Плотность теплового потока определяется по температурам лицевой и обратной поверхностей датчика [14]. В соответствии с законом Фурье плотность потока тепла к плоской пластине определяется:

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала датчика;

z – координата по нормали к поверхности датчика;

Таким образом, необходимо знать градиент температур в материале датчика. Для бесконечной пластины толщиной z , градиент температур можно

определить из решения уравнения теплопроводности с начальным $T(z)|_{t=0} = f(z)$ и граничными условиями $T(0, t) = \varphi_1(t)$ и $T(l, t) = \varphi_2(t)$, которые могут быть определены экспериментально.

Вычисленная зависимость $T(z, t)$ подставляется в уравнение (7). Зная температуры передней и обратной поверхностей датчика, можно определить тепловой поток.

1.3.5 Определение теплового потока по изменению температуры поверхности датчика

При постоянном одномерном тепловом потоке через металлическую пластину конечной толщины, находящуюся в идеальном контакте с полубесконечным слоем изоляции, изменение температуры на поверхности контакта металла и изоляции описывается выражением [15]:

$$T_m(l, t) = \frac{2\sqrt{am}}{\lambda_m} \cdot \frac{q}{1+A} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-A}{1+A} \right)^n \cdot \left[2\sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 l^2}{4am t} \right] - \frac{2n+1}{\sqrt{am}} \operatorname{erfc}\left(\frac{(2n+1)l}{2\sqrt{am t}} \right) \right]$$

где T_m – температура металла; l – линейный размер; t – время; a_m – коэффициент температуропроводности металла; λ_m – коэффициент теплопроводности металла; A – отношение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности металла и изоляции:

$$A = \frac{\lambda_i}{\lambda_m} \sqrt{\frac{a_m}{a_i}}$$

Если толщина металла значительно меньше характеристической толщины изолятора l_i которая, в свою очередь, меньше характеристической толщины металла l_m , приближенно означающей глубину проникновения теплового потока за время t , то средняя температура металлической пластины равна температуре контакта металла с изолятором:

$$T_m(l, t) = \left(2\sqrt{a_i} / \sqrt{\pi \lambda_i} \right) q t \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока к пластине.

Температура тонкой металлической пленки обычно измеряется по изменению ее электрического сопротивления $R = R_0(1 + \alpha_R T_m)$, где R_0 – электрическое сопротивление пленки при комнатной температуре; α_R – температурный коэффициент сопротивления.

1.3.6 Экспоненциальный (калориметрический) метод

В отличие от тонкопленочного термометра сопротивления в данном методе толщина металлической пластины l выбирается больше характеристической толщины металла $l > \sqrt{a_m t}$. В этом случае датчик поглощает практически все подводимое к нему тепло и тем самым является калориметром [16]. Тепловой поток Q , поступающий в такое тело за время dt , равен изменению теплосодержания элемента:

$$q = l \rho_m c_p dT / dt \quad (2)$$

где c_p – теплоемкость; l – толщина и ρ_m – плотность материала датчика.

Так как датчик имеет конечные размеры, потери тепла от металлической пластины к изолятору искривляют линейные характеристики нагрева такого калориметра. На рис.9 приведена зависимость отношения тепловых потоков, определяемая выражением:

$$Q_i / Q = \int_0^t q_i dt / q_0 t,$$

где Q_i – тепловой поток от датчика к изолятору; q_0 – плотность теплового потока к датчику от толщины датчиков и времени проведения опыта.

Наличие небольших воздушных прослоек между датчиком и изолятором значительно снижает потери тепла. Изменение температуры пластины во времени, как и в случае тонкопленочного термометра сопротивления, определяется через изменение электрических величин [17,18]. Интегрируя выражение для распределения температуры по толщине металлической пластины, и в соответствии с формулой

$dU/dt = \alpha_R R_0 I \cdot dT/dt$, характеризующей изменение напряжения U с изменением температуры датчика во времени, можно записать выражение для плотности теплового потока через среднюю температуру пластины:

$$q = \frac{1}{IR_0} \cdot \frac{\rho c_p l}{\alpha_R} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (3)$$

где I – сила тока, протекающего через датчик при напряжении U .

Выражение (3) справедливо только для одномерного теплового потока, когда каждый слой пластины имеет везде одинаковую температуру. В случае слишком толстого датчика тепло не успевает проникнуть на всю его толщину за время эксперимента и распределение температуры становится нелинейным[20,19].

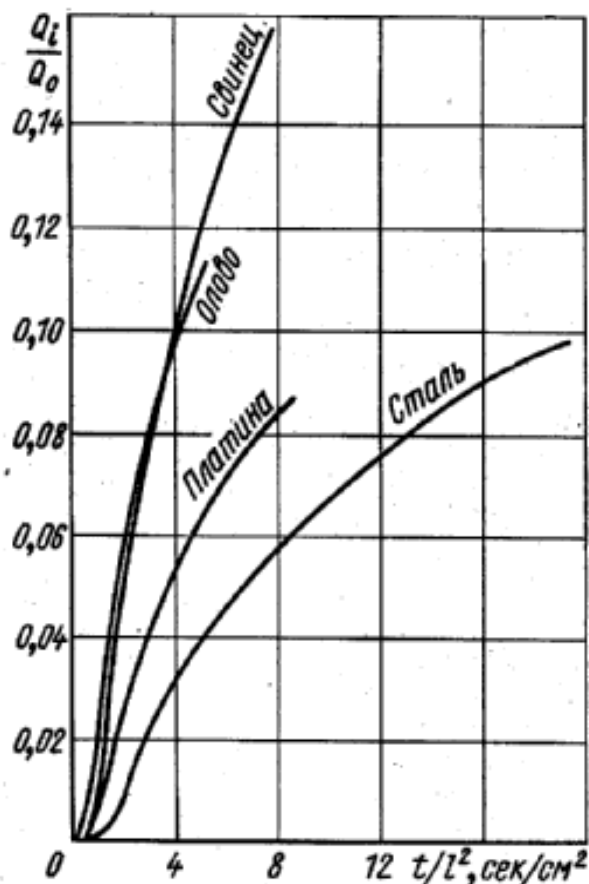


Рис.9. Утечки тепла от калориметра к изолятору для различных материалов датчика.

Температуру датчика можно регистрировать разными способами в зависимости от того, какое из выражений (2) или (3) используется. Для определения плотности теплового потока в соответствии с выражением (2) датчик заделывается в исследуемую модель, и при известных размерах и физических параметрах датчика изменение температуры во времени регистрируется дифференциальной термопарой. В работе [5] для измерения q использовались полые цилиндры с плоскими, сферическими и эллипсоидальными торцами с небольшой толщиной стенки. В качестве датчика применялись алюминиевые пробки большой толщины с заделанными внутрь термопарами. Для уменьшения погрешности, связанной с наличием радиальной составляющей теплового потока, которая обуславливает утечку тепла вдоль образующей модели, в работе [5] использовались модели в виде полусферы, состоящие из отдельных сегментов. В процессе измерения температура сегментов изменялась с различной скоростью, и изотермические условия имели место лишь в начальный момент времени. Поэтому для расчета q использовалась экстраполяция зависимостей $T(t)$ к моменту $t=0$, при котором справедливо уравнение (2).

Если для определения q используется выражение (3) то методика проведения эксперимента аналогична методике тонкопленочного термометра сопротивления. Так, в работе [5] использовалась платиновая пластина в контакте с моделью из пирекса с полусферической головкой. Датчик покрывал 30% головки модели.

При измерении тепловых потоков в сильно ионизованных газах возникало электрическое замыкание датчика по поверхности пленки, что было устранено покрытием датчика моноокисью или двуокисью кремния. В процессе отжига моноокись кремния переходит в двуокись. Толщина покрытий составляла приблизительно 0,01 мкм для тонкопленочного термометра сопротивления, а для массивного термометра сопротивления 1 мкм и 6 мкм [5].

Погрешности определения тепловых потоков данным методом связаны с неопределенностями, вносимыми самим датчиком. Трудно установить точную величину сопротивления, соответствующего эффективной поверхности датчика, а также контактное сопротивление соединений чувствительного элемента. Измеренные величины сопротивлений отличаются на $\pm 15\%$ от величины, вычисленной в соответствии с размерами датчика и данными по сопротивлению материала [5].

1.3.7 Определение теплового потока по времени до начала плавления материала

Этот метод аналогичен выше описанному методу определения теплового потока по изменению температуры поверхности [21]. В основе метода лежит решение одномерного уравнения теплопроводности для полуограниченного тела при постоянной плотности теплового потока q на поверхности. Основной определяющей величиной является $t_{пл}$ – время от начала нагревания тела до достижения температуры плавления $T_{пл}$. В соответствии с формулой (1):

$$q = (\sqrt{\pi} / 2) \sqrt{\rho c_P \lambda} / (t_{пл} T_{пл})$$

В качестве датчиков для определения плотностей тепловых потоков от воздуха, нагретого в электродуговом подогревателе, использовались медные и алюминиевые цилиндры, защищенные с боковой поверхности стекловолокном. Время до начала плавления измерялось с помощью киносъемки или секундомером.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ВЧФ-ПЛАЗМОТРОНА

Мощность, выделяемая на аноде генераторной лампы:

$$P_a = m_a \cdot C_p \cdot \Delta t_a \quad [\text{кВт}],$$

где m_a – массовый расход воды, [кг/с]; Δt_a – разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [°C]; C_p – теплоемкость воды, [кДж/кг].

Мощность, выделяемая на сеточной индуктивности:

$$P_c = m_c \cdot C_p \cdot \Delta t_c \quad [\text{кВт}],$$

где m_c – массовый расход воды, [кг/с]; Δt_c – разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [°C]; C_p – теплоемкость воды, [кДж/кг].

Мощность, выделяемая на электроде:

$$P_{эл} = m_{эл} \cdot C_p \cdot \Delta t_{эл} \quad [\text{кВт}],$$

где $m_{эл}$ – массовый расход воды, [кг/с]; $\Delta t_{эл}$ – разность начальной и конечной температуры охлаждающей воды, [°C]; C_p – теплоемкость воды, [кДж/кг].

Мощность, выделяемая на корпусе:

$$P_{кп} = m_{кп} \cdot C_p \cdot \Delta t_{кп}$$

Мощность разряда определяется по формуле:

$$P_{разр} = P_0 - (P_a + P_c + P_{эл}) \quad [\text{кВт}].$$

Мощность плазменной струи будет определяться как разность мощности ВЧФР и мощности выделяющейся на корпусе плазмотрона:

$$P_{стр} = P_{разр} - P_{кп} \quad [\text{кВт}].$$

Термический КПД плазмотрона вычисляется по формуле:

$$\eta_n = \frac{P_{сmp}}{P_{разp}} \cdot 100\%$$

Установочный КПД вычисляется по формуле:

$$\eta_{уст} = \frac{P_{сmp}}{P_0} \cdot 100\%$$

Энтальпия ВЧФР рассчитывается по формуле:

$$H_T = H_{300} + \frac{P_{разp}}{Q_{пг}} \left[\frac{\kappa ДЖ}{\kappa г} \right],$$

где $Q_{пг}$ – массовый расход плазмообразующего газа [кг/с]; H_{300} – энтальпия плазменной струи при 300 К.

Среднемассовую температуру ВЧФР определяем с помощью графической зависимости энтальпии воздуха от его температуры, представленной на рисунке

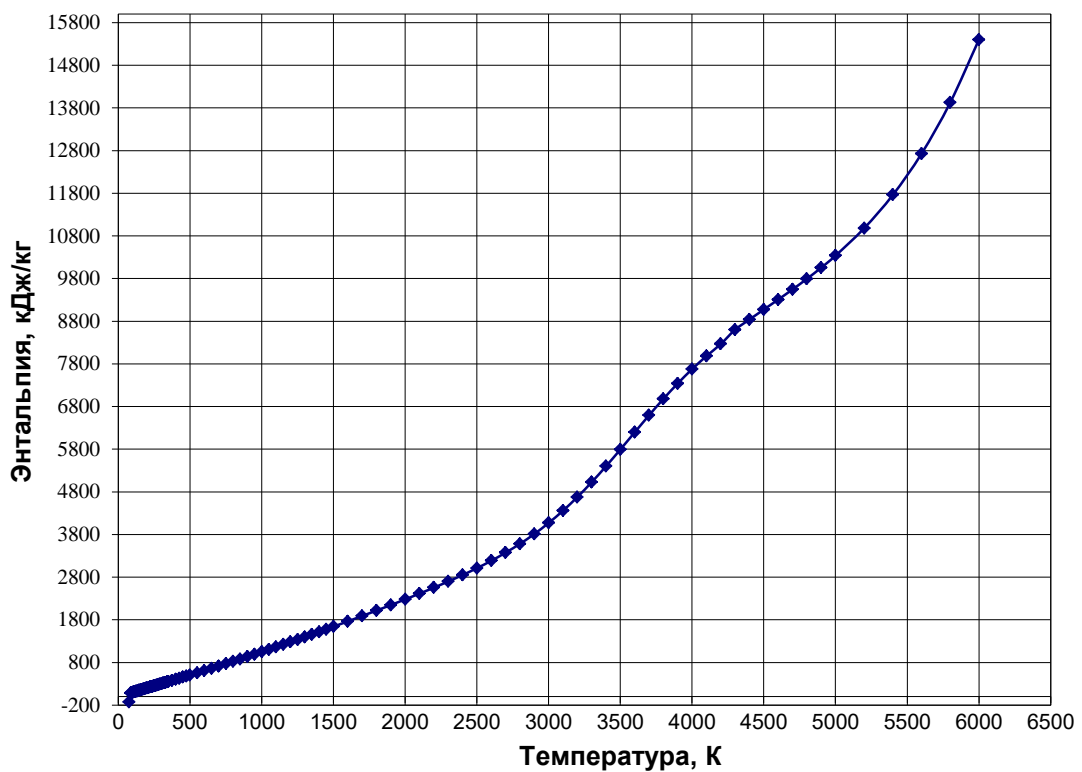


Рис.10 Зависимость энтальпии воздуха от его температуры

3. ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ВЧФ - ПЛАЗМОТРОНА

На основе полученных экспериментальных данных были проведены расчеты термических параметров ВЧФП, результаты которых приведены в таблицах 1-5 и представлены графически на рисунках 11-15.

Таблица 1. Влияние газодинамического обдува на тепловые потери на корпусе ВЧФП

$Q_{ог}, \text{ г/с}$	$J_a = 2\text{А}$	$J_a = 2,5\text{А}$	$J_a = 3\text{А}$	$J_a = 3,5\text{А}$
	$P_{кп}, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$
1,0	0,39	0,36	0,75	1,49
1,5	0,40	0,37	0,86	1,40
2,0	0,39	0,36	0,79	1,41
2,5	0,37	0,33	0,67	1,46
3,0	0,35	0,34	0,66	1,43
3,5	0,30	0,35	0,64	1,40

На рисунке 11 показано влияние газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на потери тепловой мощности в корпус ВЧ факельного плазмотрона при разных значениях тока анода (мощности ВЧ факельного разряда).

Из рисунка видно, что:

- при неизменной мощности ВЧ факельного разряда повышение расхода охлаждающего газа с 1,0 г/с до 3,5 г/с слабо влияет на нагрев корпуса плазмотрона;
- при увеличении анодного тока с 2 А до 3,5 А (или мощности разряда с 7 кВт до 24 кВт) характер зависимостей практически не изменяется.

Это говорит о том, что передача тепла на корпус осуществляется, в основном, за счет излучения от ВЧ факельного разряда, а передача тепла за

счет теплопроводности и конвективного теплообмена не играет существенной роли.

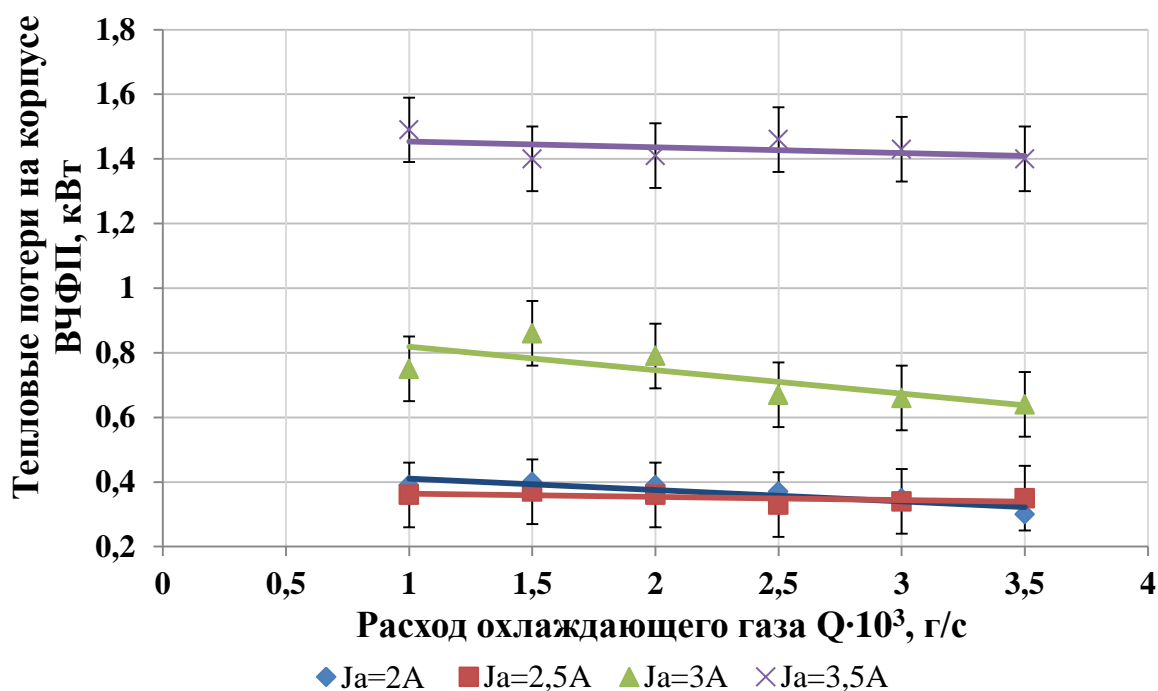


Рис.11 Влияние газодинамического обдува на тепловые потери на корпусе ВЧФП

Таблица 2. Влияние газодинамического обдува на КПД ВЧФП

$Q_{ог}$, г/с	$J_a = 2A$	$J_a = 2,5A$	$J_a = 3A$	$J_a = 3,5 A$
	$\eta_{пл}$, %	$\eta_{пл}$, %	$\eta_{пл}$, %	$\eta_{пл}$, %
1,0	75,98	81,75	84,51	85,45
1,5	77,22	81,76	84,05	86,24
2,0	77,49	82,85	84,15	86,55
2,5	79,45	84,04	85,48	85,72
3,0	81,48	84,41	85,52	86,16
3,5	84,1	83,80	85,72	85,80

На рис.12 показано влияние газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на КПД ВЧ факельного плазмотрона.

Из рисунка видно, что:

– при малых мощностях ВЧ факельного разряда $7 \div 13$ кВт ($J_A = 2 \div 2,5$ А) повышение расхода охлаждающего газа с 1,0 г/с до 3,5 г/с сильно влияет на КПД ВЧ факельного плазмотрона.

– при повышении мощности разряда до 18-25 кВт ($J_A = 3 \div 3,5$ А) влияние газодинамического обдува кварцевой разрядной камеры на КПД ВЧ факельного плазмотрона существенно снижается.

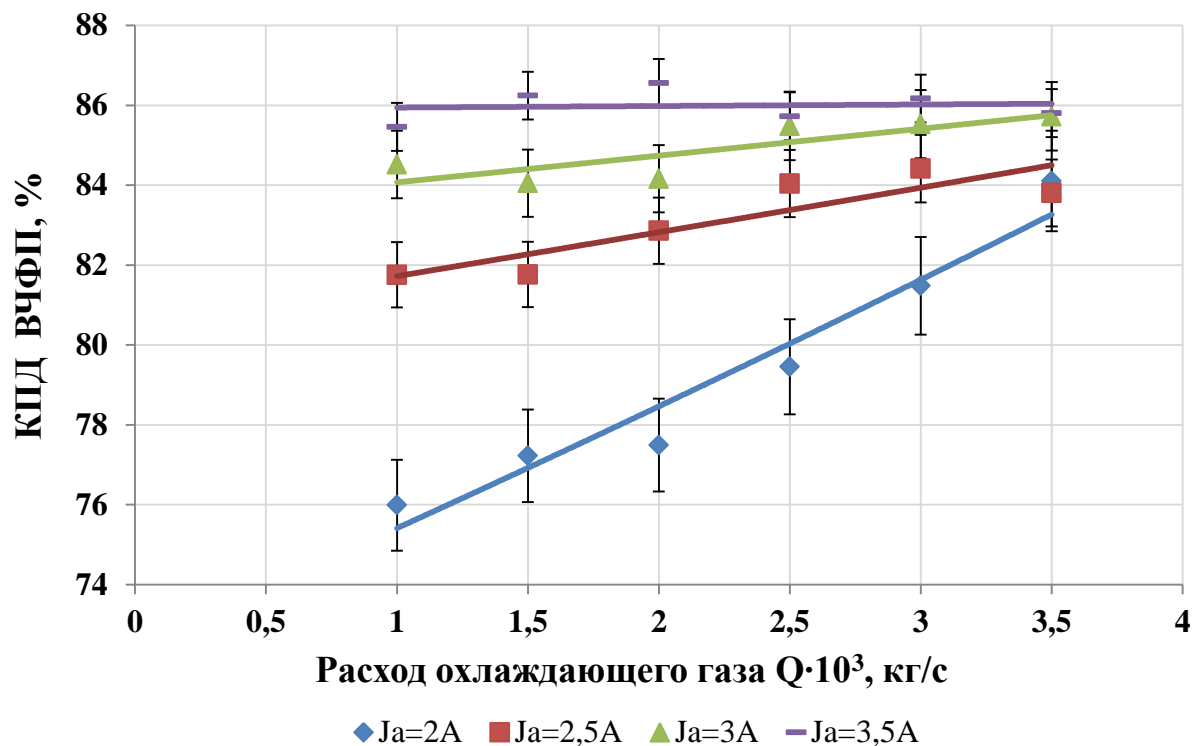


Рис.12 Влияние газодинамического обдува на КПД ВЧФП

Таблица 3. Влияние мощности ВЧФР на нагрев корпуса ВЧФП

$Q_{ог} = 3,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 3,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 2,5 \text{ г/с}$	
$P_p, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$
10,44	0,27	9,55	0,25	8,99	0,28
13,46	0,35	13,46	0,34	13,23	0,33
18,67	0,64	18,52	0,66	18,53	0,67
24,12	1,40	24,75	1,43	24,25	1,46

Таблица 3. Продолжение

$Q_{ог} = 2,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,0 \text{ г/с}$	
$P_p, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{кп}, \text{ кВт}$
8,40	0,26	8,24	0,28	7,82	0,26
12,75	0,36	12,20	0,37	12,20	0,36
17,91	0,79	17,93	0,86	17,85	0,75
24,55	1,41	24,17	1,40	23,80	1,49

На рис.13 представлена зависимость потерь тепловой мощности на корпус ВЧФП от мощности ВЧФР. Из рисунка видно что, нагрев корпуса плазмотрона возрастает с увеличением мощности разряда.

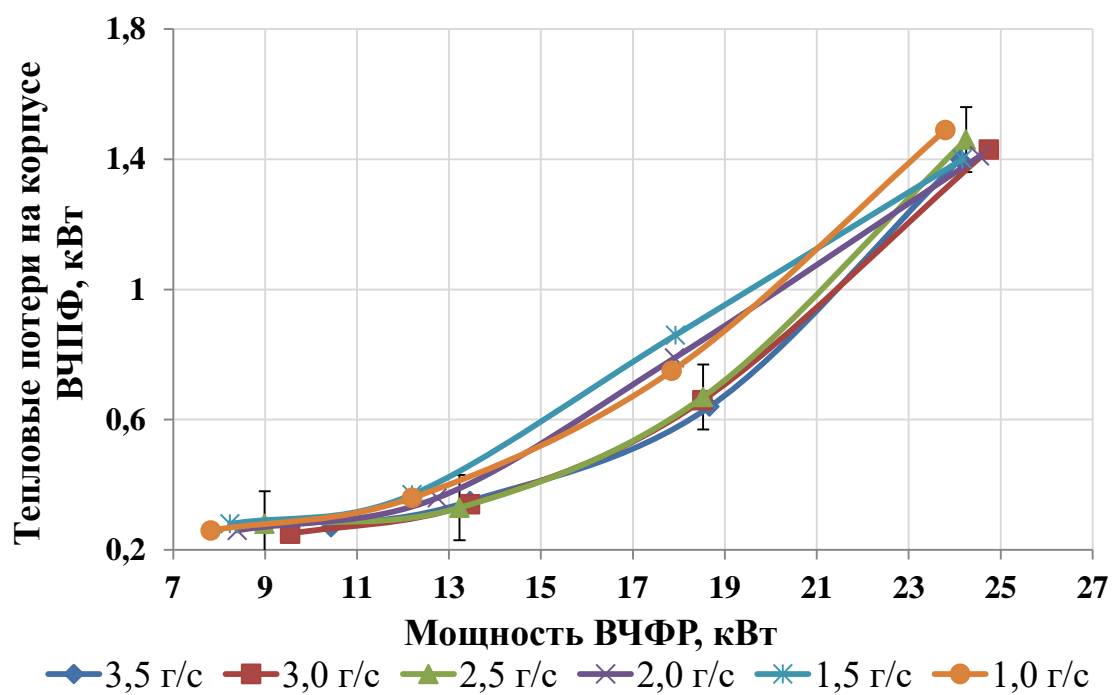


Рис. 13. Влияние мощности ВЧФР на нагрев корпуса ВЧФП.

Таблица 4. Влияние мощности ВЧФР на нагрев водоохлаждаемого электрода

$Q_{ог} = 3,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 3,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 2,5 \text{ г/с}$	
$P_p, \text{ кВт}$	$P_{эл}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{эл}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{эл}, \text{ кВт}$
10,44	1,7	9,55	1,73	8,99	1,84
13,46	2,03	13,46	2,07	13,23	2,1
18,67	2,35	18,52	2,35	18,53	2,36
24,12	2,35	24,75	2,3	24,25	2,4

Таблица 4. Продолжение

$Q_{ог} = 2,0 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,5 \text{ г/с}$		$Q_{ог} = 1,0 \text{ г/с}$	
$P_p, \text{ кВт}$	$P_{эл}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{эл}, \text{ кВт}$	$P_p, \text{ кВт}$	$P_{эл}, \text{ кВт}$
8,4	1,93	8,24	1,94	7,82	1,95
12,75	2,19	12,2	2,26	12,2	2,27
17,91	2,42	17,93	2,37	17,85	2,37
24,55	2,46	24,17	2,39	23,8	2,41

На рис.14 показано влияние мощности ВЧФР на потери тепловой мощности на водоохлаждаемом электроде.

Из рисунка видно что, при прочих равных условиях с увеличением мощности разряда тепловые потери плавно возрастают.

Таким образом, из графиков можно увидеть, что достигнутые максимальные параметры работы ВЧФП могут быть сохранены при минимальном газодинамическом обдуве.

Дальнейшее повышение этих характеристик возможно за счет нанесения светоотражающего покрытия на внутренние стенки корпуса плазмотрона для снижения тепловых потерь мощности за счет излучения от ВЧФР.

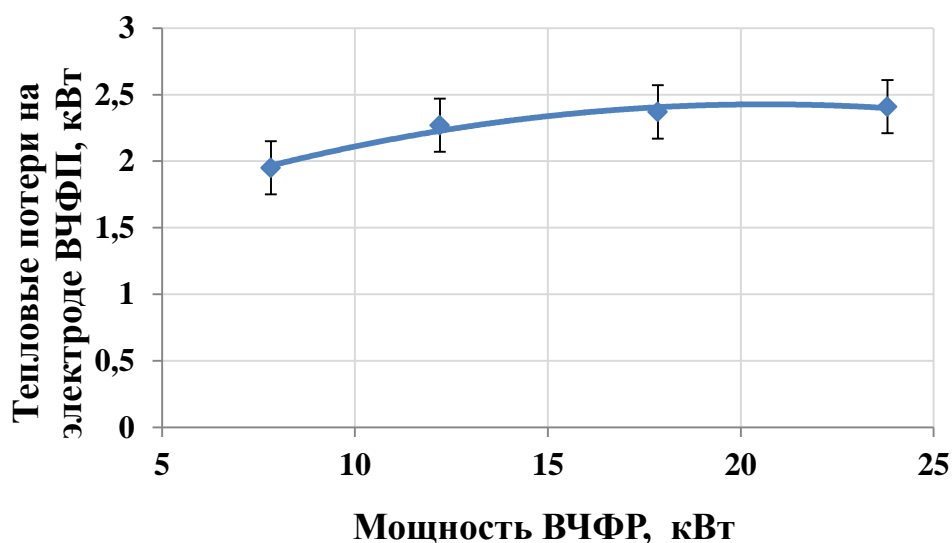


Рис 14. Влияние мощности ВЧФР на нагрев водоохлаждаемого электрода.

Таблица 5. Зависимость температуры плазменной струи от ее мощности

$P_{\text{стр}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{пл}}, \text{г/с}$	$H_T, \text{кДж/кг}$	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$
18,03	3	5603,41	3440
17,86	3	5554,82	3430
17,86	3	5553,30	3430
13,1	3	4157,47	3010
13,1	3	3006,49	3010
12,89	3	2835,07	2990
9,20	3	3006,49	2530
8,61	3	2835,07	2430
8,008	3	2655,65	2310

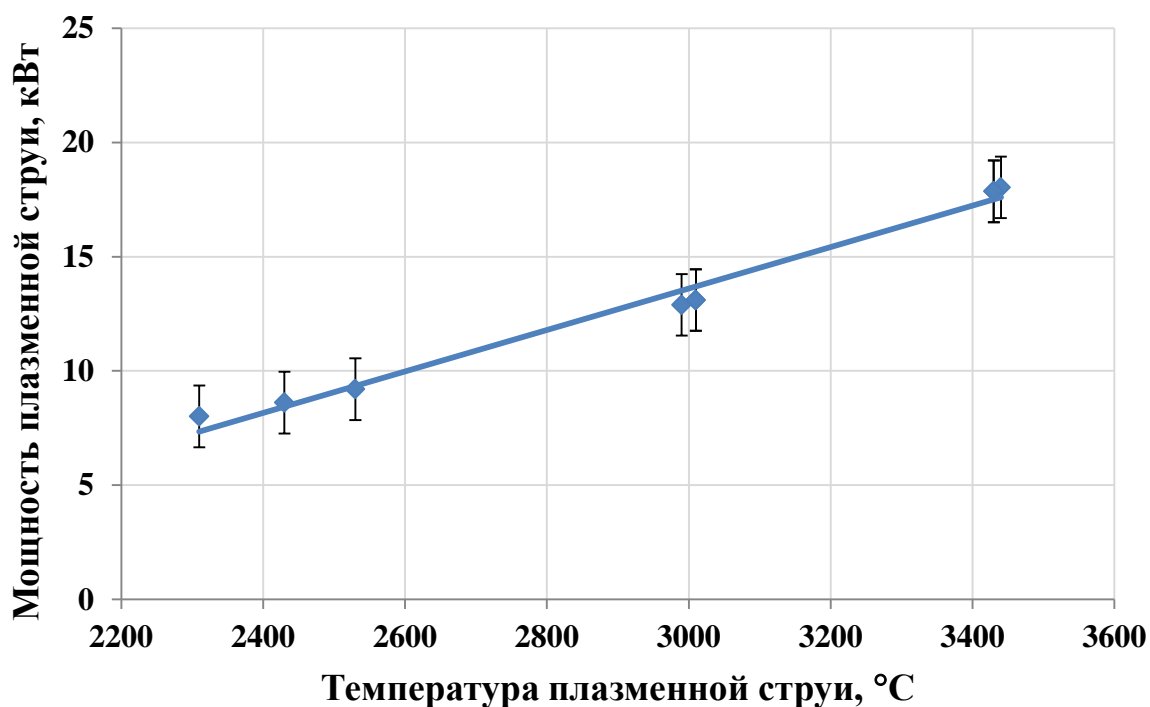


Рисунок 15. Зависимость температуры плазменной струи от ее мощности

Из графика видно, что температура плазменной струи линейно возрастает с увеличением мощности плазменной струи.

4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Низкотемпературная плазма находит применение в различных областях науки и техники – в частности такая плазма используется для получения дисперсных порошков (в том числе нано порошков), для переработки различных видов отходов: радиоактивных отходов, отходов производства органических растворителей, отходов водоочистки и т.д. Также при помощи низкотемпературной плазмы осуществляется нанесение на изделия тугоплавких, ударопрочных и других покрытий. Низкотемпературная плазма используется так же для ионизации проб в масс-спектрометрических исследованиях. Все эти процессы являются высокотехнологичными и требуют точного контроля технологических параметров плазменной струи (температура, концентрация ионов и электронов и др.). Поэтому методы диагностики используются на каждом предприятии, которые работают в выше описанных областях.

Можно привести несколько примеров заинтересованных в этой разработке предприятий:

- АО «НПФ «Микран»
- ФГУП «Радон»
- ПАО «Машиностроительный завод»

4.2 Анализ конкурентных технических решений

В данной научно-исследовательской работе использовался тепловой метод диагностики низкотемпературной плазмы. Его прямым конкурентом является зондовый метод диагностики. Рассмотрим более подробно основные достоинства и недостатки данных методов.

Тепловой метод. Простота устройства, дешевизна, безопасность эксплуатации. Погрешность измерения составляет $\pm 10\%$.

Зондовый метод. Данный метод отличается высокой точностью измерения температуры. Из недостатков следует отметить непомерно высокую стоимость диагностических зондов, необходимость введения инженером диагностического зонда непосредственно в плазменную струю.

Таблица 6. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	5	6
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,035	5	3	0,175	0,105
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,025	5	4	0,125	0,1
3. Помехоустойчивость	0,02	5	5	0,1	0,1
4. Энергоэкономичность	0,05	5	4	0,25	0,2
5. Надежность	0,2	4	5	0,8	1
6. Уровень шума	0,05	4	4	0,2	0,2
7. Безопасность	0,2	5	3	1	0,225
8. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,3	5	5	1,5	0,6
9. Простота эксплуатации	0,07	5	4	0,35	1,5
10. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,05	2	5	0,1	0,25
Итого	1	45	42	4,6	4,33

4.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Проведем SWOT-анализ исследования параметров плазменной струи. Результаты первого этапа, а именно описание сильных и слабых сторон проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 7.

Таблица 7. Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Низкая себестоимость данного метода диагностирования С2. Экономичное использование электроэнергии. С3. Компактность установки С4. Простота монтажа установки и эксплуатации.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Незнученность метода и сложность в его развитии Сл2. Низкая актуальность исследований
Возможности: В1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив В2. Усовершенствование установки В3. Сотрудничество с научными исследовательскими		

центрами		
Угрозы: У1. Появление более актуальных методик У2. Малый спрос на установку.		

Второй этап заключается в том, что необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Результаты приведены в таблице 8.

Таблица 8. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	+	+
	B2	-	+	+	+
	B3	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Возможности проекта		Сл1		Сл2	
	B1	-		-	
	B2	-		-	
	B3	-		-	
Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	-	-	-	-
	У2	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Угрозы проекта		Сл1		Сл2	
	У1	+		+	
	У2	-		-	

Таблица 9. SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Низкая себестоимость плазмоподавляющих добавок.</p> <p>С2. Экономичное использование электроэнергии.</p> <p>С3. Компактность установки</p> <p>С4. Простота монтажа установки и эксплуатация.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Незнученность метода и сложности в его развитии</p> <p>Сл2. Низкая актуальность исследований</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив</p> <p>В2. Усовершенствование установки</p> <p>В3. Сотрудничество с научными исследовательскими центрами</p>	<p>Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив, по усовершенствованию установки и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.</p>	<p>В свою очередь незнученность метода, а также низкая актуальность может внести много трудностей при работе с установкой и разработке новых проектов.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Появление более актуальных методик</p> <p>У2. Малый спрос на установку.</p>	<p>Угрозы слабо влияют на сильные стороны проекта, так как присутствует возможность ее усовершенствования и проведения новых опытов.</p>	<p>Угрозы могут отрицательно сказаться на реализации данной установки в научно-исследовательской деятельности, так как малый спрос и появление более актуальных методик могут сыграть свою роль.</p>

4.4 Планирование научно-исследовательских работ

4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Таблица 10. Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель
	3	Выбор направления исследований	Руководитель
	4	Проведение патентных исследований	Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, дипломник
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Руководитель, дипломник
	7	Построение макетов (моделей) и проведение экспериментов	Руководитель, дипломник
	8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Руководитель, дипломник
	9	Анализ и обработка полученных результатов	Руководитель, дипломник
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Дипломник

4.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

$$t_{ож1} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ дн.}$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{oji}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

t_{oji} – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

$$T_{Pi} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб.дн.}$$

4.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; 365

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; 52

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году. 14

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округлены до целого числа.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} \approx 1.22$$

Таблица 11. Временные показатели проведения научного исследования

Этап	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{\min} , чел-дни	t_{\max} , чел-дни	$t_{\text{ожс}}$, чел-дни			
1	0,5	1,5	0.9	Руководитель	0,9	1
2	1	2	1.4	инженер	1,4	2
3	3,5	4,5	3.9	инженер	3,9	5
4	0,5	1,5	0.9	инженер	0,9	1
5	3	3.5	3.2	руководитель, инженер	1,6	2
6	3	3.5	3.2		1,6	2
7	2.5	3	2.7		1,35	2
8	1.5	2	1.7	руководитель, инженер	0,85	1
9	2	2.5	2.2		1,1	2
10	4	5.5	4.6	инженер	4,6	6
Итого:			25		19	24

4.4.4 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;

- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.4.5 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{\text{расх}i} ,$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

Π_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Величина коэффициента (k_T), отражающего соотношение затрат по доставке материальных ресурсов и цен на их приобретение, зависит от условий договоров поставки, видов материальных ресурсов, территориальной удаленности поставщиков и т.д. Транспортные расходы принимаются в пределах 15-25% от стоимости материалов. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 12.

Таблица 12. Материальные затраты

Наименование	Единиц а измерен ия	Количеств о	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Электроэнергия	кВт/ч	315	2,51	790,65
Баллон со сжатым воздухом	м ³	1	290	290
Баллон с углекислым газом	м ³	1	250	250
Итого			542,51	1330,65

4.4.6 Амортизация оборудования

Рассчитаем амортизацию оборудования:

$$C_{аморт} = \frac{C_{об}}{T},$$

где $C_{об}$ – стоимость оборудования (руб);

T – срок службы (дней).

$$C_{аморт} = \frac{2500000}{2920} = 856,2$$

$$C_{аморт} = 856,2 \cdot 2 = 1712,4 \text{ рублей}$$

4.4.7 Основная заработная плата исполнителей темы.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата;

Основную заработную плату руководителя НИР можно рассчитать по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d},$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 13. Расчетный годовой фонд рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
-выходные дни	52	52
-праздничные дни	14	14
Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Потери рабочего времени: - отпуск	56	56
- невыходы по болезни	—	—

Действительный годовой фонд рабочего времени	243	243
--	-----	-----

Количество месяцев работы без отпуска в течение года при отпуске в 56 дней составляет $M = 10,4$ месяца. Тогда,

для руководителя: $Z_{\text{дн}} = \frac{43001 \cdot 10,4}{243} = 1840 \text{ рублей}$

для инженера: $Z_{\text{дн}} = \frac{19291 \cdot 10,4}{243} = 825 \text{ рублей}$

Основная заработная плата:

Для руководителя: $Z_{\text{осн}} = 1840 \cdot 7,4 = 13616 \text{ рублей}$

Для инженера: $Z_{\text{осн}} = 825 \cdot 15,95 = 13200 \text{ рублей}$

Месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{\text{тс}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5

Для руководителя: $Z_{\text{м}} = 22052 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 43001$

Для инженера: $Z_{\text{м}} = 9893 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 19291$

Таблица 14. Результаты расчета основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{р}}$	$k_{\text{д}}$	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	Т раб раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	22052	0,3	1,3	0,2	43001	1840	7,4	13616
Инженер	9893	0,3	1,3	0,2	19291	825	15,95	13200

Таблица 15. Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Руководитель	Бакалавр
------------------	--------------	----------

Основная зарплата, руб	13616	13200
Итого по статье $C_{зн}$, руб	26816	

4.4.8 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды;

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%

$$З_{внеб} = 0,271 \cdot 26816 = 7277 \text{ рублей}$$

Таблица 16. Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	Сумма отчислений
Руководитель проект	13616	0,271	3689
Инженер	13200	0,271	3577
Итого			7277

4.4.9 Накладные расходы

Экспериментальные исследования проводились 9 дней по одному часу, мощность установки 35 кВт/час.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C_{эл} = \Pi_{эл} \cdot P \cdot F_{об},$$

где $\Pi_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию;

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Тариф на промышленную электроэнергию для «Национального исследовательского Томского политехнического университета» составляет 5,8 руб. за 1 кВт ч.

$$C_{эл} = 5,8 \cdot 9 \cdot 35 = 1827 \text{ руб.}$$

Затраты на водоснабжение:

$$C_{вод} = \Pi_{вод} \cdot Q \cdot F_{об},$$

где $\Pi_{вод}$ – тариф на промышленное водоснабжение (24,66 руб за 1 м³);

Q – расход воды, м³;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

$$C_{вод} = 24,66 \cdot 1,8 \cdot 9 = 400 \text{ руб.}$$

4.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта. Бюджет затрат приведен в таблице 16.

Таблица 17. Затраты научно-исследовательской работы

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	1330,65
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	1712,4
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	26816

4. Отчисления во внебюджетные фонды	7277
5. Накладные расходы	2227
6. Бюджет затрат НТИ	39363,05

4.6 Определение ресурсоэффективности исследования

Определение ресурсоэффективности происходит на основе расчета интегрального показателя ресурсоэффективности научного исследования. Данный показатель можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_i^n a_i \cdot b_i,$$

где

I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности заносим в таблицу 17

Таблица 18. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1
1. Производительность	0,3	5
2. Энергосбережение	0,2	4
3. Надежность	0,4	5
4. Материалоемкость	0,1	4
ИТОГО	1	

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,1 = 4,7$$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что научно-техническое исследование будет ресурсоэффективно при первом варианте исполнения проекта, т.е. при высокой производительности и надежности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Таблица 19. Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,7
3	Интегральный показатель эффективности	0,21

5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Охрана труда – система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [21].

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности [21].

Эксперименты проводились в лаборатории Физико-технического института на кафедре технической физики.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов при работе в лаборатории

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

В таблице 20 представлены основные виды работ, которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 20 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на плазменной установке. Обработка результатов на ПЭВМ	Электромагнитное излучение	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
		Пожарная	ГОСТ Р 12.3.047-2012 ССБТ. Пожарная безопасность.

На работника лаборатории, проводящего экспериментальные исследования, могут воздействовать следующие факторы:

Физические:

- температура и влажность воздуха;
- температура оборудования;
- шум;
- статическое электричество;
- электромагнитное поле высокой частоты;
- освещённость;
- наличие излучения.
- вредные вещества

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на плазменной установке и ПЭВМ.

5.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

5.2.2 Организация рабочего места пользователя ПК.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 16 [21].

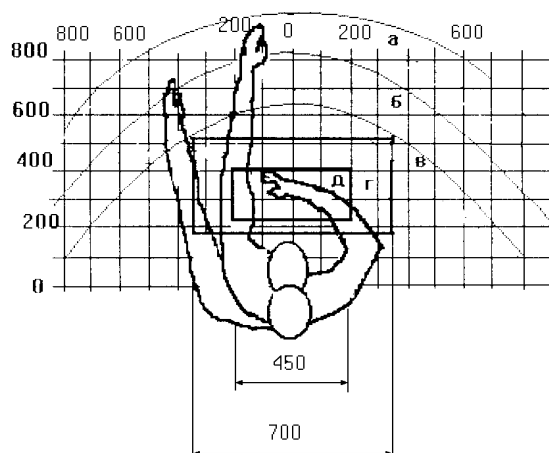


Рисунок 16. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости, а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация:

- в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе;
- в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680 – 800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше – если угол обзора будет составлять 30° .

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте + 3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15° .

5.2.3 Правила техники безопасности при эксплуатации установки

Для исключения аварийных ситуаций и безопасного выполнения работ необходимо строго соблюдать указанную последовательность запуска установки:

- Включить в генераторе автоматические выключатели F1, F2.
- Поставить в генераторе переключатель мощности в положение 50% или 100 % (в соответствии с плановым заданием).
- Закрыть все двери генератора и технологического блока.
- Включить рубильник Q1 на генераторном блоке.
- Включить рубильник на питающем щите, при этом включается вентилятор воздушного охлаждения генераторной лампы.
- Подать охлаждающую воду общим краном на водяном коллекторе, при этом на генераторе загорится сигнальная лампа «ОХЛАЖДЕНИЕ».
- Включить на генераторе первую ступень накала кнопкой S2. Через 40

сек кнопкой S1 включить вторую ступень накала. Загорается белая сигнальная лампа «БЛОКИРОВКА АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ».

- Поставить на генераторе тумблер S10 на генераторном блоке в положение «РУЧНАЯ РАБОТА».
- Включить систему «мокрой» очистки отходящих из реактора газов б.
- Включить компрессор 7 и подать в плазмотрон 3 плазмообразующий газ.
- Нажатием кнопки S3 на генераторе включить «НАГРЕВ» и подать высокое напряжение на электрод плазмотрона, одновременно «поджечь» разряд в плазмотроне 7 с помощью автоматического устройства.
- Во время работы установки запрещается открывать, снимать ограждения, отключать предохранительные и блокирующие устройства. Все работы производить при закрытых дверях генератора и технологического блока.
- Во время работы установки следить за индикаторными лампами «ОХЛАЖДЕНИЕ», «НАКАЛ», «НАГРЕВ» на генераторе и датчиками расхода плазмообразующего газа, охлаждающей воды на пульте управления технологического блока.
- Периодически снимать режимные параметры работы установки и заносить их в рабочий журнал. При необходимости производить корректировку этих параметров в соответствии с плановым заданием.
- Во время работы установки следить за сигнальной лампой режима «РАБОТА», расположенной на пульте управления и контроля за технологическим процессом, при сбое технологического режима, автоматически выключается режим «НАГРЕВ» генератора и электроприводы подачи шлама, что сопровождается сигналом звонка.
- В случае возникновения аварийной ситуации: локальный прогар стенок реактора при «закорачивании» высокотемпературного канала

высокочастотного факельного разряда на металлическую поверхность внутренних стенок реактора, – термомпара показывает всплеск температуры.

5.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 6.

Таблица 21 - Оптимальные и допустимые параметры микроклимата.

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

При эксплуатации плазменной установки в окружающую среду выбрасываются вредные газообразные вещества, такие как оксиды азота, углерода, с концентрацией, не превышающей нормы предельно допустимых

концентраций.

В таблице 7 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ и их класс опасности.

Классы опасности:

1 – вещества чрезвычайной опасности.

2 – вещества высоко опасные.

3 – вещества умеренно опасные.

4 – вещества мало опасные.

Таблица 22 - Нормы ПДК

№	Вещество	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
1	Оксид азота	5,0	2
2	Диоксид азота	2,0	2
3	Оксид углерода	20,0	4
4	Диоксид серы	10,0	3
5	Сумма углеводородов	300,0	4

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20..25 °С, зимой – 13..15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого

ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. Шум компрессора высокочастотного генератора используемой установки не превышает 40 дБ.

Высокочастотный генератор производит электромагнитное излучение, которое сводится к нулю за счет экранирования.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеосигнала. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5ГГц – 2кГц – 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 2,5В/м.
- Плотность магнитного потока должна быть не более:
- в диапазоне частот 5ГГц – 2кГц – 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц – 400кГц – 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от электромагнитных помех:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. Конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не

более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

5.4 Электробезопасность

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [22].

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ или другими электрическими приборами и установками в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта электрических приборов;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или

вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;

- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпус токоведущих и электропоражающих частей) [22].

Электрозащитные средства – это переносимые и перевозимые изделия, служащие для защиты людей, работающих с электроустановками, от поражения электрическим током, от воздействия электрической дуги [22]. Эти средства должны обеспечивать высокую степень защиты и удобство при эксплуатации. Их выбирают с учетом требований безопасности для данного вида работ. В первую очередь безопасность обеспечивается применением средств коллективной защиты, а затем, если она не может быть обеспечена, применяют средства индивидуальной защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся [22]:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть заблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;
- изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;
- устройства дистанционного управления;
- предохранительные устройства и др.

При выполнении данной ВКР, использовался ВЧФ-плазменный стенд с использованием высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13. Данный генератор питается от сети с промышленным напряжением 380 В, с анодным напряжением 10,4÷10,5 кВ и номинальной потребляемой мощностью

100 кВт.

При использовании данного оборудования строго выполнялись требования по электробезопасности, все операции выполнялись руководителем, имеющим допуск до работ с напряжениями свыше 1000 В.

5.5 Пожарная безопасность

Согласно нормам пожарной безопасности, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [23,24]. Так как помещение лаборатории по степени пожароопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения,

правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

1. Сообщить руководству (дежурному);
2. Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112;
3. Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

ВЫВОДЫ

1. Проведен обзор и анализ литературы по высокочастотным плазмотронам и методам определения параметров плазменных струй, генерируемых плазмотронами. На их основе сделан выбор ВЧФ-плазмотрона с газодинамическим обдувом кварцевой разрядной камеры.

2. Разработана методика расчета теплофизических параметров плазменных струй, генерируемых ВЧФ-плазмотроном.

3. Проведены экспериментальные исследования режимов работы ВЧФ-плазмотрона. Установлены закономерности влияния интенсивности газодинамического обдува разрядной камеры на теплофизические параметры плазменных струй и определены режимы с максимальным КПД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке новых и модернизации действующих промышленных установок на базе ВЧФ-плазмотронов для эффективной утилизации промышленных отходов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров И. А. Высокочастотные факельные плазмотроны и их практическое применение // Известия СО АН СССР, Серия техн. наук. – 1980. – №. 8. – С. 3 – 13.
2. Руденко К. В. Диагностика плазменных процессов в микро-и нанoeлектронике //Химия высоких энергий. – 2009. – Т. 43. – №. 3. 63 с.
3. Григорович Р., Кристеску Д. – К теории ВЧФ-разряда – М.: Наука, 1985 г. – 108 с.
4. Васильев А.С. Ламповые генераторы для ВЧ-нагрева – Спб: Машиностроение, 1979 г. 87 с.
5. Дресвин С. В. Физика и техника низкотемпературной плазмы. – М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.
6. Крапивина С. А. Физика низкотемпературной плазмы. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1978, 86 с.
7. Крапивина С. А. Основы плазмохимии. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1971,104с.
8. Русанов В. Д. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. – М.: Атомиздат, 1985, – 387 с.
9. Mac Kinnon J.M., Wichens A.J. – Chem.a.Ind., 1983, № 16, p. 800-801.
10. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск, Наука, 1975. 296 с.
11. Тихомиров И.А. и др. // Известия ВУЗов. Физика. – 1974. – №4. – С.34.
12. Диагностика плазмы / Под ред. М.И. Пергамента. – Вып. 7. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.
13. Диагностика плазмы / Под ред. С. Леонарда. – М.: Мир, 1971.
14. Веретенников В.А. // Физика плазмы. – 1985. – Т. 11. – В. 11. – С. 1411-1416.

15. Крапивина С. А. Плазмохимические технологические процессы. – М.: Химия, 1981. – 247с.
16. Пархоменко В.Д., Цыбулев П.Н., Краснорутский Ю.И. Технология плазмохимических производств: Учебное пособие. – К.: Выща шк., 1991.
17. Жуков М. Ф. Свойства низкотемпературной плазмы и методы её диагностики. – Новосибирск: Наука, 1977. – 295с.
18. Синкевич О. А., Стахалов И. П. Физика плазмы. – М.: Высшая школа, 1991. – 190 с.
19. Goldberger W. M. – Brit. Chem. Eng., 1963, v. 8, p. 610 – 613. Chem. Eng., 1966, v. 73, №6, p. 173 – 176.
20. Do Pount. New Burner Opens Door to Arc. – Chem. Week. Jan., 1954, v. 18, p. 64 – 66.
21. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
22. ГОСТ 12.1.038 – 82 ССБТ. Электробезопасность.
23. Пожаро и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004 – 85 ССБТ Пожарная безопасность
24. ППБ 01 – 03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.